



## Deleminasyon içeren eğri eksenli kompozit kirişlerin titreşim davranışlarının incelenmesi

**Mine USLU UYSAL\***

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34349, Beşiktaş, İstanbul  
[mineuslu@yildiz.edu.tr](mailto:mineuslu@yildiz.edu.tr) ORCID:0000-0003-1618-3203 , Tel: (212) 383 2826

Geliş: 04.12.2017 , Kabul Tarihi: 07.02.2018

### Öz

*Bu çalışmada, ankastre serbest sınır koşullarına sahip, delaminasyon içeren eğri eksenli kompozit kirişlerde titreşim davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. ANSYS® sonlu elemanlar programı kullanılarak, dört farklı tabaka dizilişine (0/30°, 0/45°, 0/60° ve 0/90°) ve iki farklı delaminasyon yerine (kenar delaminasyon ve orta delaminasyon) sahip eğri eksenli kompozit kirişler modellenmiş ve doğal frekansları araştırılmıştır. Modellenen kirişlerde yer alan delaminasyon bölgeleri doğrusal olmayan özellik taşıdığından, modellerde kontak elemanlar kullanılmış ve sonuçlara olan etkisi vurgulanmıştır. Geliştirilen sonlu elemanlar modeliyle kirişler üzerinde titreşim analizleri yapılmış ve hesaplanan doğal frekanslar literatürde mevcut sonuçlarla karşılaştırılarak uyumlu olduğu gösterilmiştir; böylece modelin doğrulanması yapılmıştır. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre açılı-tabakalı kompozit kirişin delaminasyon oranı arttıkça, kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğü görülmüştür. Ayrıca, kenar delaminasyon koşulundaki kirişlerin doğal frekanslarının, orta delaminasyon koşulundaki kirişlere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En yüksek doğal frekans değerleri 0/90° tabakalı kirişte elde edilirken, sırasıyla 0/30°, 0/45° ve 0/60° tabaka açılarında sahip kirişlerde doğal frekans değerlerinin düştüğü görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** Eğri eksenli kompozit kirişler; Delaminasyon; Doğal frekans; Mod şekilleri; Sonlu elemanlar yöntemi

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Ortotropik özelliklere sahip tabakaların farklı açılarla üst üste yerleştirilmeleri ile elde edilen tabakalı kompozit malzemeler yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmaları nedeniyle otomotiv, uzay uçak, inşaat ve yapı olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mekanik özellikleri tabakaların diziliş biçimi ve açılara bağlı olan bu malzemeleri farklı yükleme koşulları için istenilen özelliklerde üretmek mümkündür. Çeşitli alanlarda kullanılan, bu malzemelerden meydana gelen kiriş elemanları önemli yapı bileşenleridir ve analizleri güvenlik açısından önemli rol oynar. Özellikle, kiriş yapılarının belirli eğriliğe sahip özel durumlarıyla, yani eğri eksenli kirişlerle, yüksek dayanım gerektiren karmaşık geometriye sahip gemi, uçak ve roket vb. yapılarda sıklıkla karşılaşılır.

Kirişler çeşitli uygulamalarda yük taşıyan yapılar olarak kullanıldıkları için kompozit kiriş yapıların tasarımında en önemli problemlerden biri titreşimdir. Literatürde, farklı yükleme ve sınır koşulları altında düz ve eğri eksenli kompozit yapıların titreşim davranışları incelenmiştir. Örneğin, Hajianmaleki ve Qatu (2013) çalışmalarında, eğri eksenli lamine kompozit kirişler üzerine 1989-2012 yılları arasında yapılan titreşim analizlerini ele almışlardır. Chidamparam ve Leissa (1993) eğri eksenli çubuklarda ve kirişlerde titreşim problemlerini incelemiştir. Kapania ve Raciti (1989) lamine kompozit kiriş ve plaklar üzerinde titreşim analizleri yapmışlardır. Ayrıca, kompozit kabuk, plak ve kirişlerin titreşimi hakkında yazılmış kitaplarda (Qatu, 2004) literatürde yer almaktadır.

Kompozit malzemeler, dayanımlarını azaltan ve yapısal bütünlüklerini bozan hasar ve kusurlara büyük oranda eğimlidirler. Tabakalar arası zayıf mukavemetten dolayı en sık rastlanan hasar, tabakalar arası kırılma veya süreksizlik bölgesinin (delaminasyonun) oluşumudur. Delaminasyonlar, imalat sırasında tabakalar arasında hava kabarcıkları kalması

veya reçineleme işleminin yetersiz yapılması gibi sebeplerden kaynaklanabilir. Bu durumda, delaminasyon hasarı tabakaların mukavemetinde ve rijitliğinde azalmaya sebep olur ve bunun sonucu olarak da delaminasyonlar titreşim karakteristiklerinde bir değişim meydana getirirler. Çeşitli alanlarda kullanılan, delaminasyona uğramış kompozit kirişlerin incelenmesi literatürde yer almaktadır. Yang vd. (1998) delaminasyonlu kirişlerin doğal frekanslarını nümerik olarak incelemiştir. Kompozit kiriş kullanarak elde ettikleri ilk dört modu literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Singh ve Abdelnaser (1992) değişken sınır şartlarına sahip tabakalı kompozit kirişlerin serbest titreşimlerinin yanında zorlamalı titreşimlerini de incelemiştir. Palacz vd. (2005) on iki tabakaya sahip ankastre kompozit kirişin delaminasyonunu incelemek için sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Della ve Shu (2006) çalışmalarında, çok tabakalı delaminasyonlu kirişlerin serbest titreşimlerini analiz etmişlerdir. Analizlerindeki nümerik sonuçlar, zorlanmış ve serbest mod kullanılarak elde edilmiş olup, zorlanmış mod frekansının delaminasyonlu bölgelerde eğilme rijitliğini önemli oranda etkilediğini ortaya koymuşlardır. Kim vd. (2003) tekli ve çoklu delaminasyonların yerleşim yerlerinin doğal frekansı nasıl etkilediklerini araştırmak için bir analiz metodu geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, doğal frekansların tabaka açılarının değişimi ile değiştiğini ve delaminasyon yerinin mod şeklinin değişimi ile tespit edilebileceğini göstermişlerdir. Matsunaga (2001), tabakalı kompozitlerin doğal frekanslarını, kalınlık değişimini de göz önüne alarak analiz etmiştir. Ayrıca, Shiau (1992) hem çapraz-tabakalı hem de açılı-tabakalı kompozit yapıların delaminasyona uğramış hallerinin titreşim davranışlarını incelemiştir. Araştırmacı, çapraz-tabakalı dizilime sahip lamine kompozitlerde, delaminasyon içeren kısmın eğilme rijitliğinin, büyük ölçüde azaldığını göstermiştir. Genel olarak, tabakalar delaminasyonların yeri, sayısı ve büyüklüğüne bağlı olarak yeni titreşim modları ve frekansları sergilerler. Dahası

delaminasyonların doğal frekansını azaltarak, bu düşük frekansın çalışma frekansına yakın olması durumunda rezonansa sebep olabilir. Delaminasyonlu kompozit kirişlerde titreşim hakkında yapılan birçok çalışma düz kiriş ve plaklar içeren yapılar üzerine yapılmıştır. Fakat birçok yapı çeşitli eğriliklere sahip kirişlerden oluşmaktadır. Bundan dolayı delaminasyon içeren eğri eksenli kirişlerin titreşim analizlerinin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır

Bu çalışmanın amacı, bir ucu serbest diğer ucu ankastre sınır şartlarına sahip olan delaminasyonlu eğri eksenli açılı-tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekans değişimlerini nümerik olarak araştırmak, ayrıca hesaplanan doğal frekanslar ve mod şekilleri yardımıyla, eğri eksenli kirişin nasıl bir davranış sergileyeceğini inceleyerek literatürdeki boşluğu doldurmaktır. Çalışmada, delaminasyon yerinin ve tabaka açılarının doğal frekansa ve mod şekillerine etkileri, tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

## Delaminasyon İçeren Eğri Eksenli Kompozit Kirişin Sonlu Elemanlar Modeli

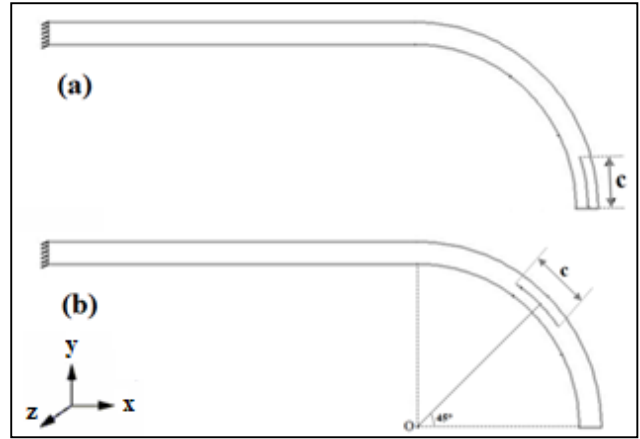
Sonlu elemanlar yöntemi, problemlere doğrudan yaklaşımla çözümün mümkün olmadığı ya da zor olduğu durumlarda problemi alt birimlere ayırarak bu birimlerin çözümünden, ana çözümü elde etmek için kullanılan bir metottur. Bu metotta, ilk olarak geometrik olarak karmaşık çözüm bölgesi basit alt bölgelere ayrılır ve her elemandaki sürekli fonksiyonlar doğrusal polinomların kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Daha sonra aranan değerler, her eleman içinde yer alan düğüm noktaların üzerinden elde edilir. Sonlu elemanlar çözümünde birçok bilgisayar programı vardır. ANSYS® sonlu elemanlar programı bunlardan biridir ve bu çalışmada kullanılmıştır.

Çalışmada ele alınan, eğri eksenli ankastre kiriş modelinin ölçüleri ve geometrisi Şekil 1'de verilmektedir. Modellemede, kiriş üzerindeki delaminasyon bölgesi; kenar delaminasyon ve

orta delaminasyon olmak üzere iki farklı şekilde oluşturulmuştur. Kenar delaminasyonu, ankastre mesnetli eğri eksenli kirişin ucunda yer alırken, orta delaminasyon eğri kirişe 45°'lik açıyla konumlandırılmıştır (Şekil 2). Eğri eksenli kirişin toplam uzunluğu  $L$  ( $50+2\pi/4$ ) ve delaminasyonun uzunluğu  $c$  olarak verilmiştir. Eğri eksenli kirişte  $c/L$  oranını arttırarak (0,05; 0,1; 0,15; 0,20; 0,25) doğal frekans değişimleri hem orta hem de kenar delaminasyonları için incelenmiştir.



Şekil 1. Delaminasyon içeren eğri eksenli ankastre kompozit kirişin geometrisi ve ölçüleri



Şekil 2. Kirişteki delaminasyon bölgeleri a) kenar delaminasyon, b) orta delaminasyon

Ankastre kiriş malzemesi tabakalı kompozit malzemedir ve mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Malzemede tabaka sayısı 6 ve her bir tabakanın kalınlığı 0,5 mm'dir. Delaminasyon orta tabakada yer almaktadır. Tabaka dizilişlerinde ise 4 farklı açı kullanılmıştır ve kompozit malzemenin tabaka dizilişleri (0/30°), (0/45°), (0/60°) ve (0/90°) şeklindedir Yapılan çalışmada tabaka sayısı sabittir.

Literatürde, kompozit malzeme tabaka sayısının kiriş titreşimi üzerine etkilerinin incelendiği

çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Çevik (2007) çalışmasında, kompozit kirişlerde tabaka sayısını 2 ile 40 arasında değiştirerek incelemeler yapmıştır. Bu çalışmasında, simetrik çapraz tabakalı kirişlerde tabaka sayısının artması ile doğal frekansın azaldığını göstermiştir. Bunun yanında hem simetrik olmayan çapraz-tabakalı kirişlerde hem de açılı-tabakalı kirişlerde tabaka sayısının artmasıyla doğal frekansın arttığını belirtmiştir.

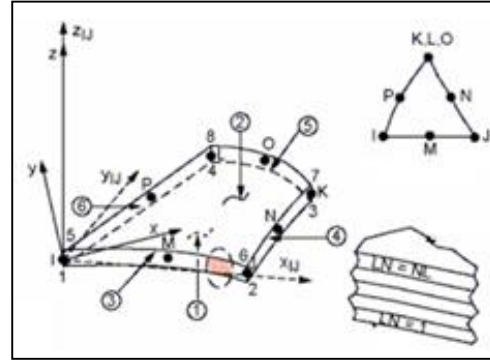
**Tablo 1.** Kompozit malzemenin mekanik özellikleri

Elastisite Modülü (GPa)	$E_{xx}$	$E_{yy}$	$E_{zz}$
	38	11	11
Kayma Modülü (GPa)	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{xz}$
	4,9	4,9	4,9
Poisson Oranı	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$
	0,28	0,12	0,28

Delaminasyon içeren eğri eksenli kompozit kiriş modellerinin sonlu elemanlar analizi için ANSYS® (ANSYS® 13.0, Canonsburg, California, USA) programı kullanılmıştır. ANSYS® sonlu elemanlar programının içerisinde eleman tipinin seçilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada kullanılacak elemanın titreşim ve tabakalı kompozit özelliklerinde kullanılabilmesi gerekir. Bu özellikleri sağlayan eleman olarak Shell-99 seçilmiş ve yapının tümünde kullanılmıştır. Shell-99 elemanı, 8 düğümlü ve her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi olan dönme ataleti ve kayma deformasyonu etkilerini dikkate alan üç boyutlu bir elemandır. Shell-99 tabakalı modeller için kullanılabilir ve 250 tabakaya kadar çalışmaya izin verir. Sunulan çalışmada 6 tabaka için kullanılmıştır. Ayrıca, ortotropik (kompozit) malzemelerde de kullanılır. Shell-99 elemanı mesh yapılırken üçgen ya da kübik olarak eleman parçalara ayrılabilir. Shell-99 elemanının geometrisi Şekil 3'de görülebilir.

Sonlu elemanlar analizinde, kirişin orta tabakasında delaminasyon oluşturulurken, delaminasyonlu bölgede kontak eleman tanımlanmıştır. Kontak eleman tanımlanmazsa, özellikle yüksek modlarda kirişin katmanları birbirine geçer ve gerçek sonuca yakın değerler alınması zorlaşır. Yapılan bu modellemede,

kontak eleman kullanılmasının kirişin doğal frekans değerlerinin daha doğru çıkması için önemli olduğu görülmüştür. Sonlu eleman analizi, sonsuz serbestlik derecesine sahip sürekli yapıların sonlu sayıdaki elemanlardan oluşan bir yapı şeklinde tanımlanması ve bu yapının sonlu serbestlik dereceli ayrı bir yapıya dönüştürülerek statik ve dinamik analizlerin yapılması şeklinde tanımlanır. Bu makalede, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak teorik modal analiz yapılmıştır. Bu analizin amacı, yapıların doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek, hesaplanan doğal frekanslar ve mod şekilleri aracılığıyla sistemlerin hangi frekanslarda rezonansa gireceği ve ne tür bir davranış göstereceği konusunda bilgi edinmektir.



**Şekil 3.** Shell-99 eleman tipinin geometrisi

Zorlanmamış serbest titreşim durumunda denklem (1)'den yararlanır.

$$(K - \omega_i^2 \cdot M) \cdot \vec{\varphi}_i = 0 \quad (1)$$

burada, K direngenlik matrisi, M kütle matrisi,  $\vec{\varphi}_i$  yer değiştirme vektörü (modal vektör) ve  $\omega_i$  i modunun doğal frekansıdır. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için denklem (2) şartının sağlanması gerekmektedir.

$$\det(K - \omega_i^2 \cdot M) = 0 \quad (2)$$

Bu determinantın sıfıra eşitlenmesiyle,  $\omega_i^2$  cinsinden karakteristik bir denklem elde edilir. Bu denklemin kökleri ilgilenilen mod aralığındaki doğal frekansları tanımlar. Bu doğal frekansların denklemlerde yerine yazılmasıyla, o frekandaki mod şekilleri ortaya

çıkar. ANSYS® sonlu elemanlar programı, kirişin modellenmesinde kullanılan eleman tipine göre yapının direngenlik ve kütle matrislerini hesaplar. Sonrasında oluşturulan denklemin kökleri sayısal yöntemlerle hesaplanarak sistemin doğal frekansları elde edilir. Yapılan çalışmada, denklemin köklerinin bulunmasında Block-Lanczos algoritması kullanılmış, ayrıca iterasyon sayısı 100 olarak belirlenmiştir.

## Karşılaştırma Yapılarak Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması

Bu bölümde sonlu elemanlar modelinin doğrulanması için, literatürde yer alan (Hu vd., 2002; Shen ve Grady, 1992; Luo ve Hanagud, 2000) ankastre mesnetlenmiş delaminasyon içeren kompozit kirişlerin farklı yöntemlerle yapılan çözümleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Hu vd. (2002), tabakalı kirişin serbest titreşimini incelemek için, sonlu elemanlar metodunu kullanmıştır. Bunun yanı sıra, Shen ve Grady (1992) delaminasyon içeren ve delaminasyonsuz kompozit kirişin doğal frekans değerlerini deneysel yolla elde etmiştir. Luo ve Hanagud (2000) ise analitik yöntem kullanarak doğal frekansı elde etmiştir.

Bu çalışmada sunulan modelin doğrulanması için, ortotropik malzeme özelliklerine sahip tüm tabaka kalınlıkları aynı olan 0/90° açılı tabakalı kompozit bir kiriş seçilmiştir. Bu kirişin özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

**Tablo 2.** Modelin doğrulanmasında kullanılan kompozit kirişin mekanik özellikleri

Elastisite Modülü (GPa)	$E_{xx}$	$E_{yy}$
	134	10,3
Kayma Modülü (GPa)	$G_{xy}$	$G_{xz}$
	5	5
Poisson Oranı	$\nu_{xy}$	
	0,33	
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	
	1,48	

Seçilen kompozit kirişin boyutları; L (kiriş boyu)=127 mm, b (kiriş eni)=12,7 mm, h (kirişin kalınlığı)=1,02 mm ve delaminasyon büyüklüğü için a (delaminasyon boyu)=50,8

mm'dir (Hu vd., 2002). Sunulan çalışmada oluşturulan sonlu elemanlar modeli, literatürde yer alan kirişe (Hu vd., 2002) uygulanarak 1. moddaki doğal frekans değerleri hem delaminasyonlu hem de delaminasyonsuz kiriş için elde edilmiş ve sonuçlar literatürde yer alan (Hu vd., 2002; Shen ve Grady, 1992; Luo ve Hanagud, 2000) sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tablo 3'de görüldüğü gibi bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan modelleme kullanılarak elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan sonuçlarla uyum içerisindedir.

**Tablo 3.** Ankastre mesnetlenmiş kompozit kirişin 1. moddaki doğal frekanslarının karşılaştırılması

Çalışma	Delaminasyonsuz Kiriş	Delaminasyon Büyüklüğü (a=50,8 mm ve h=0,51 mm)
Shen ve Grady (1992), Deneysel	80,087 Hz	75,369 Hz
Luo ve Hanagud (2000), Analitik	81,86 Hz	76,807 Hz
Hu vd. (2002), SEM	81,87 Hz	76,522 Hz
Bu çalışma, SEM	<b>81,93 Hz</b>	<b>73,34 Hz</b>

Yapılan çalışmada kullanılan delaminasyon içermeyen kiriş modellemesi ile literatürde yer alan deneysel (Shen ve Grady, 1992) sonuçlar arasında %2,30'luk bir fark vardır. Bu fark delaminasyon içeren kiriş için %2,77'dir. Bunun yanı sıra, sunulan çalışmada a=50,8 mm ve h=0,51 mm büyüklüğüne sahip delaminasyon içeren kiriş modelinin sonuçları ile literatürde yer alan analitik çözüm (Luo ve Hanagud, 2000) ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında fark %4,73, sonlu elemanlar çözümü (Hu vd., 2002) ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında ise fark yalnızca %4,34'tür.

## Analiz Sonuçları ve Tartışma

Model oluşturulduktan sonra, hazırlanan eğri eksenli kompozit kiriş modellerinin titreşim analizleri yapılmış doğal frekansları ve mod şekilleri tespit edilmiştir. Tabaka dizilişleri (0/30°), (0/45°), (0/60°) ve (0/90°) şeklinde olan kompozit malzemeden yapılan eğri eksenli kiriş modellerinin ilk 10 mod için titreşim frekans değerleri Tablo 4 ve Tablo 5'de görülmektedir.

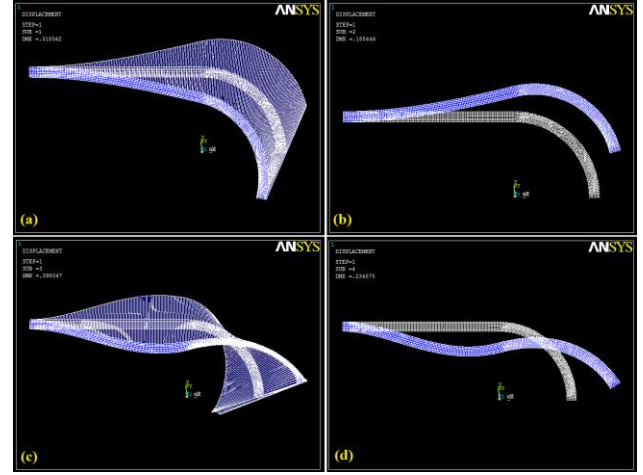
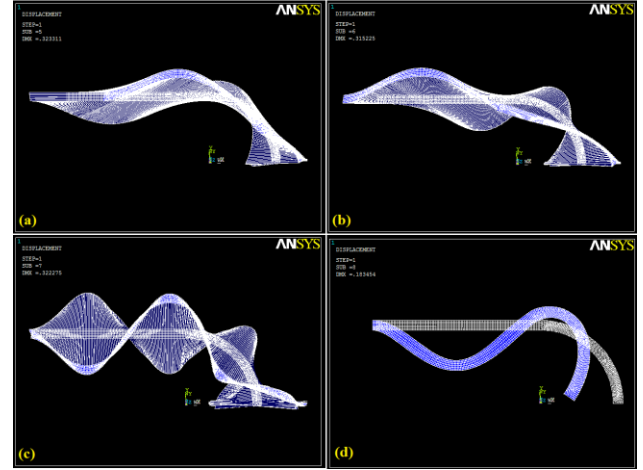
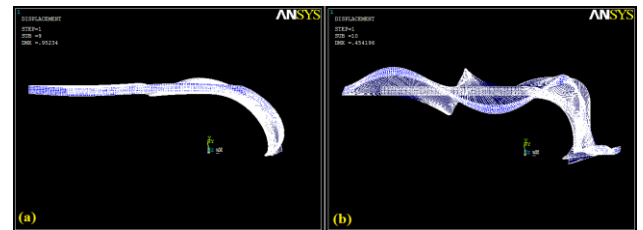
**Tablo 4.** Tabaka dizilişi 0/90° ve 0/30° olan eğri eksenli konsol kirişin ilk 10 mod için doğal frekansları

Mod No.	0/90° için Doğal Frekans (Hz)	0/30° için Doğal Frekans (Hz)
1	39,237	34,987
2	90,688	89,012
3	192,4	172,02
4	504,47	462,07
5	507,22	492,55
6	531,18	509,96
7	1066,3	959,96
8	1343,7	1269,9
9	1528,9	1440,3
10	1673,5	1560,3

**Tablo 5.** Tabaka dizilişi 0/45° ve 0/60° olan eğri eksenli konsol kirişin ilk 10 mod için doğal frekansları

Mod No.	0/45° için Doğal Frekans (Hz)	0/60° için Doğal Frekans (Hz)
1	33,364	32,745
2	87,641	86,824
3	164,07	161,29
4	438,61	428,53
5	485,54	482,02
6	507,73	507,6
7	913,73	892,82
8	1225	1204,4
9	1387,5	1363,5
10	1528,8	1511,1

Şekil 4 – Şekil 6’da 0/60° tabaka dizilişine sahip eğri eksenli kompozit kirişin mod şekilleri ilk 10 mod için görülmektedir. Diğer tabaka dizilişleri için de mod şekilleri benzerdir. Şekil 4 ve Şekil 5’de görüldüğü gibi, 1, 3, 5, 6, 7, 9 ve 10 modları burulma modları ve 2, 4 ve 8 modları eğilme modlarıdır. Şekil 6’da ise serbest uçtaki kesit çarpılmalarının yüksek olduğu (örneğin 10. mod) belirgin olarak görülmektedir.

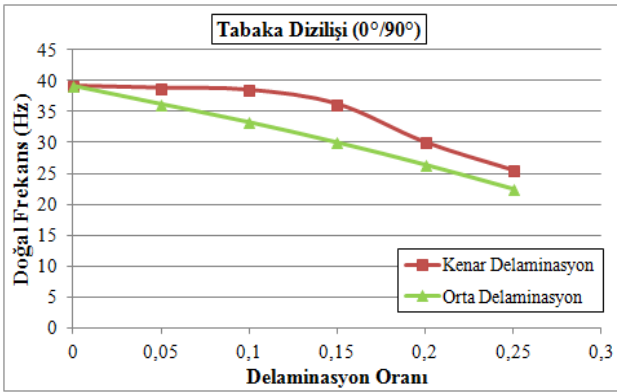
**Şekil 4.** Tabaka dizilişi 0/60° olan kompozit kirişin mod şekilleri a) mod 1 b) mod 2, c) mod 3, d) mod 4**Şekil 5.** Tabaka dizilişi 0/60° olan kompozit kirişin mod şekilleri a) mod 5 b) mod 6, c) mod 7, d) mod 8**Şekil 6.** Tabaka dizilişi 0/60° olan kompozit kirişin mod şekilleri a) mod 9 b) mod 10

Açılı-tabakalı laminelerden oluşan kompozit kirişin delaminasyon içermesi durumunda ise, frekans modlarının değişmesi hatta çakışması durumu incelenmiştir. Çoğunlukla delaminasyon durumlarında, ilk iki modda



frekans çakışması meydana gelebilir. Bunun sebebi, delaminasyon dolayısıyla doğal frekanslarda meydana gelen azalmanın delaminasyon uzunluğuna bağlı olarak artması ve mod 2'nin frekansının mod 1'in frekansına göre önemli ölçüde azalarak bir noktada her iki frekansın çakışması olarak gösterilebilir.

ANSYS® kullanılarak modellenen delaminasyon içeren eğri eksenli kompozit kirişin c delaminasyon büyüklüğü ve L toplam kiriş boyunu göstermek üzere delaminasyon oranları (c/L) artırılarak doğal frekans değişimleri, dört farklı (0/30°, 0/45°, 0/60° ve 0/90°) tabaka dizilişi için incelenmiştir ve Şekil 7 – Şekil 10'da sunulmuştur. Ayrıca, grafiklerde kenar ve orta delaminasyon olmak üzere iki farklı delaminasyon konumu karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

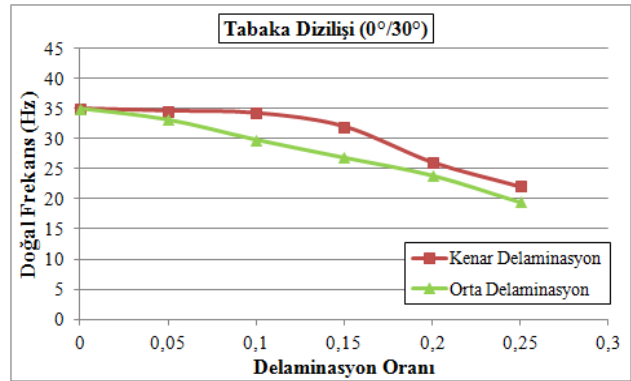


Şekil 7. Tabaka dizilişi 0/90° olan kompozit kirişte, 1. moda ait doğal frekansın delaminasyon oranına göre değişimi

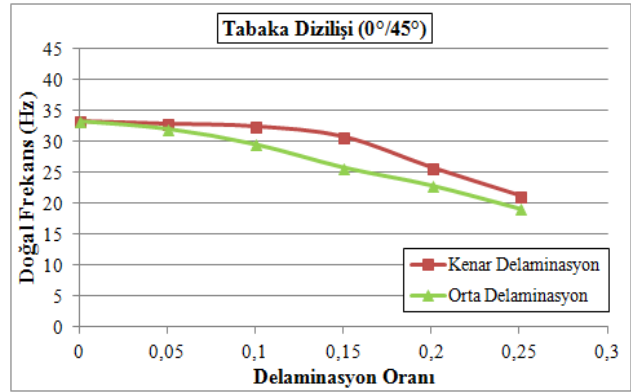
Şekil 7'de ankastre serbest sınır şartlarına sahip tabaka dizilişi 0/90° olan kompozit kirişin doğal frekanslarının, delaminasyon oranına göre (c/L) değişimi görülmektedir. Kenar delaminasyonuna sahip kirişte 0,1 delaminasyon oranına kadar belirgin bir düşme görülmemiş, 0,1 delaminasyon oranından sonra keskin bir düşüş gözlenmiştir. Orta delaminasyona sahip kirişte ise doğal frekans düşmeleri 0,05'den itibaren görülmektedir.

Aynı ölçülere sahip kenar delaminasyonlu kompozit kirişin doğal frekansı, delaminasyon oranı (c/L) 0,05'de 0/30° derecede tabaka

diziliminde yaklaşık 35 Hz iken (Şekil 8), tabaka dizilişi 0/90°'de ise yaklaşık 40 Hz değerine yaklaşmaktadır.



Şekil 8. Tabaka dizilişi 0/30° olan kompozit kirişte, 1. moda ait doğal frekansın delaminasyon oranına göre değişimi

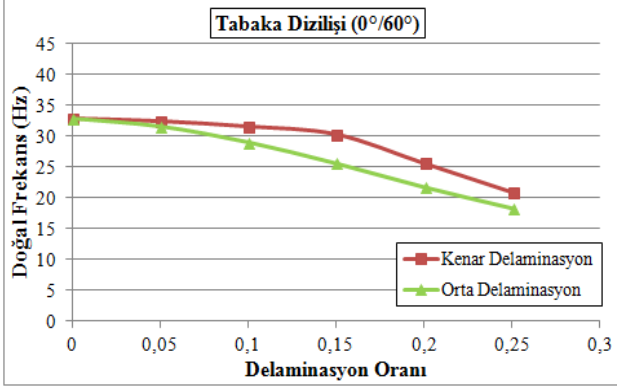


Şekil 9. Tabaka dizilişi 0/45° olan kompozit kirişte, 1. moda ait doğal frekansın delaminasyon oranına göre değişimi

Şekil 9'da 0/45° derece tabaka dizilişine sahip kompozit kirişin hem kenar hem de orta delaminasyonlardaki doğal frekans değerlerinin delaminasyon oranına (c/L) göre değişimi görülmektedir. Delaminasyon oranı arttıkça, kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğü görülmektedir. Tabakalı kompozit kirişin direngenliği delaminasyon oranının artmasıyla gittikçe azalmakta ve bunun sonucu olarak da doğal frekans değerleri düşmektedir.

Tüm eğri eksenli kompozit kiriş modelleri içinde, en düşük doğal frekans değerleri 0/60° derece tabaka dizilişine sahip kompozit kirişte görülmektedir. Örneğin, Şekil 10'da 0,25

delaminasyon oranında,  $0/60^\circ$  tabaka dizilişine sahip kompozit kirişte kenar delaminasyonu durumda doğal frekans değeri yaklaşık 20,8 Hz, orta delaminasyon durumunda ise yaklaşık 18,2 Hz olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Tabaka dizilişi  $0/60^\circ$  olan kompozit kirişte, 1. moda ait doğal frekansın delaminasyon oranına göre değişimi

Şekil 7 – Şekil 10’da ankastre sınır koşulunda, çeşitli tabaka dizilişlerine ( $0/90^\circ$ ,  $0/30^\circ$ ,  $0/45^\circ$  ve  $0/60^\circ$ ) sahip eğri eksenli kompozit kirişlerin, farklı delaminasyon oranlarındaki (c/L) doğal frekans değişimleri hem orta hem de kenar delaminasyon koşulu için görülmektedir.

Yukarıda verilen grafiklerin ortak özellikleri şöyle özetlenebilir. Eğri eksenli kirişte delaminasyon oranı (c/L) arttıkça kirişlerin 1. moddaki doğal frekanslarının düştüğü gözlenmiştir. Delaminasyonun konumu da doğal frekans değerlerini etkilemektedir. Kenar delaminasyon koşulunda kirişlerin doğal frekansları, orta delaminasyon koşuluna göre her zaman yüksektir. Yine dört grafikte kompozit kirişlerin tabaka dizilişlerinin değişimi ile doğal frekans değerlerinin değiştiği de görülebilir. Bu sonuçlar incelendiğinde, delaminasyonun titreşim üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Ayrıca, açılı-tabakalı kompozitlerde tabaka diziliş açısının x-yönünde değişmesi, yapının direngenliğinin de x-yönünde azalmasına sebep olmaktadır. Doğal frekans değerleri, tabaka diziliş açısına ters orantılı bir davranış göstermektedir. En yüksek doğal frekans değerleri  $0/90^\circ$  tabakalı kirişte görülmektedir. Daha sonra sırasıyla  $0/30^\circ$ ,  $0/45^\circ$

ve  $0/60^\circ$  tabaka açılarında sahip kirişlerde doğal frekanslar değerleri düşmektedir. Sunulan grafikler, kirişin tabaka açısının ve imalat sırasında veya sonradan ortaya çıkan delaminasyon konumunun doğal frekans üzerinde ne kadar etkili olduğu konusunda fikir edinmeye yardımcı olabilir. Bunun sonucu olarak, imalata başlanmadan veya imalat esnasında üretim yöntemi değiştirilerek maddi kayıp veya oluşabilecek hasarın/kazanın önüne geçilebilir.

## Sonuç

Yüksek dayanım gerektiren uçak gemi gibi karmaşık geometrilere sahip yapılarda kirişlerin belirli bir eğriliğe sahip özel durumlarıyla yani eğri eksenli kirişlerle sıklıkla karşılaşılır. Kiriş malzemesi seçiminde, yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmaları nedeniyle tabakalı kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılır. Fakat bu malzemeler yapısal bütünlüklerini bozan kusur ve hasarlara büyük oranda eğilimlidirler. En sık rastlanan hasar ise tabakalar arası delaminasyondur. Delaminasyonlar, tabakaların direngenliğinde azalmaya sebep olur ve bunun sonucu olarak da kirişin titreşim karakteristiklerinde bir değişim meydana getirirler. Bu çalışmada, bir ucu serbest diğer ucu ankastre sınır koşullarına sahip, delaminasyonlu, eğri eksenli ve açılı-tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekans değişimleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada, delaminasyon yerinin ve tabaka açılarının doğal frekansa etkileri araştırılmıştır. Bunun için, ANSYS® kullanılarak modellenen delaminasyon içeren eğri eksenli kompozit kirişin, c delaminasyon büyüklüğü ve L toplam kiriş boyunu göstermek üzere delaminasyon oranı (c/L) arttırılarak doğal frekans değişimleri, dört farklı ( $0/30^\circ$ ,  $0/45^\circ$ ,  $0/60^\circ$  ve  $0/90^\circ$ ) tabaka dizilişinin her biri için hem kenar hem de orta delaminasyon koşulunda ayrı ayrı hesaplanmış ve grafikler halinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre; açılı-tabakalı kompozit kirişin delaminasyon oranı (c/L) arttıkça, kirişin doğal frekans değerlerinin düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi, tabakalı



kirişin kütlesi değişmeden direngenliğinin, delaminasyon oranı arttıkça azalmasıdır. Bunun yanı sıra, kenar delaminasyon koşulundaki kirişlerin doğal frekansları, orta delaminasyon koşulundaki kirişlere göre her zaman yüksektir. Ayrıca, kirişlerin analizinde tabaka dizilişlerinin değişimi ile doğal frekansın değiştiği görülmüştür. Malzemede, tabaka diziliş açısının x-yönünde değişmesi, direngenliğinin x-yönünde azalmasına yol açmıştır. Doğal frekanslar, fiber açısına ters orantılı bir davranış göstermiştir. En yüksek doğal frekans değerleri  $0/90^\circ$  tabakalı kirişte görülmüş, daha sonra sırasıyla  $0/30^\circ$ ,  $0/45^\circ$  ve  $0/60^\circ$  tabaka açılarında sahip kirişlerde doğal frekanslar değerleri düşmüştür. Eğer yapının çalışma frekansları biliniyorsa, açılı-kompozit kirişin tasarımında istenmeyen rezonans durumunun oluşmaması için tabaka açılarının değişiminden faydalanılabilir. Çalışmada sunulan, sonlu elamanlar modelinin doğrulanması için, literatürde yer alan (Hu vd., 2002; Shen ve Grady, 1992; Luo ve Hanagud, 2000) farklı yöntemlerle yapılan çözümler ile karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçların literatürde mevcut sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

## Kaynaklar

- Chidamparam, P., Leissa, A.W., (1993). Vibrations of planar curved beams, rings, and arches, *Applied Mechanics Reviews*, 46(9), 467-484.
- Çevik, M., (2007). Çapraz-tabakalı ve açılı tabakalı kompozit kirişlerin serbest titreşim analizi, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 139-145.
- Della, C.N., Shu, D., (2006). Vibration of delaminated multilayer beams, *Composites Part B: Engineering*, 37, 227-236.
- Hajianmaleki, M., Qatu, M.S., (2013). Vibrations of straight and curved composite beams: a review, *Composite Structures*, 100, 218-232.
- Hu, N., Fukunaga, H., Kameyama, M., Aramaki, Y., Chang, F.K., (2002). Vibration analysis of delaminated composite beams and plates using a higher order finite element, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 1479-1503.
- Kapania, R.K., Raciti, S., (1989). Recent advances in analysis of laminated beams and plates, part II: vibration and wave propagation, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 27(7), 935-946.
- Kim, S.K., Chattopadhyay, A., Ghoshal, A., (2003). Characterization of delamination effect on composite laminates using a new generalized layerwise approach, *Composite Structures*, 81, 1555-1566.
- Luo, H., Hanagud, S., (2000). Dynamics of delaminated beams, *International Journal of Solids and Structures*, 37, 1501-1519.
- Matsunaga, H., (2001). Vibration and stability of angle-ply laminated composite plates subjected to in-plane stresses, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(8), 1925-1944.
- Palacz, M., Krawczuk, M., Ostachowicz, W., (2005). The spectral finite element model for analysis of flexural shear coupled wave propagation. part 2: delaminated multilayer composite beam, *Composite Structures*, 68, 45-51.
- Qatu, M.S., (2004). *Vibration of laminated shells and plates*, Elsevier Academic Press, Netherlands.
- Shen, M.H.H., Grady, J.E., (1992). Free vibrations of delaminated beams, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 30(5), 1361-1370.
- Shiau, L., (1992). Flutter composite laminated beam plates with delamination, new method of calculation for flexible substructures on two parameter elastic foundation, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 30(10), 2504-2511.
- Singh, M.P., Abdelnaser, A.S., (1992). Random response of symmetric cross-ply composite beams with arbitrary boundary conditions, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 30(4), 1081-1088.
- Yang, S., Gibson, R.F., Gu, L., Chen, W.H., (1998). Modal parameter evaluation of degraded adhesively bonded composite beams, *Composite Structures*, 43, 79-91.

## Investigation of vibration behavior of curved composite beams with delamination

### Extended abstract

*In structures with complex geometries such as aircraft, which require high stiffness, the beams are often encountered with special cases with a certain curvature, i.e., curved beams. In the selection of beam material, layered composite materials are widely used because of their high strength/weight ratio. However, these materials tend to be largely defective with defects and damage that distort their structural integrity. Delaminations cause a reduction in the stiffness of the layers, which in turn results in a change in the vibration characteristics of the beam.*

*In this study, vibration behaviors were investigated by using finite element method in curved composite beams with delamination. Using the ANSYS® finite element program, curved composite beams with delamination were modeled meticulously, with four different layer orientation angle (0/30°, 0/45°, 0/60° and 0/90°) and two different delaminations place (edge delamination and middle delamination). When the edge delamination is located at the end of the beam, the middle delamination curve is positioned at 45° of the x-axis. Since the delamination place in the modeled beams have nonlinear properties, contact elements were used in the models and their effect on the results was emphasized. Additionally, the total length of the curved beam is given as  $L(50+2\pi r/4)$  and the length of the delamination as  $c$ . And five different delamination ratio ( $c/L$ ) (0,05; 0,1; 0,15; 0,20; 0,25) were modeled in the curved composite beams.*

*Vibration analysis on the beams was carried out with the developed finite elements model and natural frequencies were calculated. Mod shapes and vibration frequency values were presented for the first 10 modes. In the initial modes, bending and torsion modes were found in the vertical and horizontal plane. And also in the high modes, it is obvious that the cross-section distortion at the free end of beam is very high.*

*The effect of the layer orientation angle (0/30°, 0/45°, 0/60° and 0/90°) and delamination place (edge delamination and middle delamination) and delamination ratio ( $c/L$ ) on the natural frequency*

*were investigated for the clamped-free boundary conditions curved composite beams.*

*According to the results obtained, as the ratio of delamination ( $c/L$ ) of the layer composite beam increases, the natural frequency values of the beam decrease. This is because the rigidity of the beam decreases as the delamination rate increases. Besides, the natural frequencies of the beams in the edge delamination condition are always higher than those in the middle delamination condition. Furthermore, in analysis of the beams, it has been seen that the natural frequency changes with the change of the layer orientation angle. The change in x-direction of the fiber angle in the material caused the rigidity to decrease in x-direction. The natural frequency values showed a reverse behavior in the fiber direction. The highest natural frequency values were observed in the 0/90° layered beam, then the values of the natural frequencies in the beams with 0/30°, 0/45° and 0/60° layer angles respectively decreased. If the working frequencies are known the variation of the layer angles can be used to avoid unwanted resonance in the design of the curved composite beam. And also, the presented study can help to get an idea of how effective the layer orientation angle and the position of the delamination during or after manufacture are on the natural frequency. As a result, the material loss or damage that may occur can be avoided without starting the production or changing the production method during manufacturing*

*To validate the finite element analysis, the model presented in this study was compared with the solutions from literature (Hu vd., 2002; Shen ve Grady, 1992; Luo ve Hanagud, 2000) and it was seen that the results obtained were in accordance with the results in the literature.*

**Keywords:** Composite curved beams, delaminations, natural frequencies, mode shapes, finite element method